

Violation de la symétrie de renversement du temps dans l'expérience



Sandrine Emery-Schrenk

Représentant la collaboration BABAR

Congrès général de la SFP, Marseille

Mini-colloque « les deux infinis », le 2 juillet 2013



Irfu
Institut de recherche
sur les lois fondamentales
de l'Univers

- **Introduction**

- Violation de la symétrie de renversement du temps?
- Les symétries Charge, Parité, et Temps
- Le mélange des quarks et la violation de CP
- Les oscillations en leur antiparticule des mésons beaux neutres $B^0-\bar{B}^0$

- **L'expérience BABAR**

- Présentation de l'expérience
- Méthodes d'analyse
- Mesure de la violation de CP



- **Mesure de la violation de T**

- **Principe**

Bernabeu & Bañuls, PLB464, 117 (1999)
Wolfenstein, Int. Jour. Mod. Phys. E8, 501 (1999)
Quinn, J. Phys. Conf. Ser. 171, 012001 (2009)



- **Mesure avec les désintégrations de mésons beaux dans BABAR**

PRL 109, 211801 (2012)

Violation de la symétrie de renversement du temps

Irréversibilité « classique »:

- Augmentation de l'entropie
 - Augmentation du nombre d'états possibles, le retour à l'état initial devient improbable
- Evolution vers un état plus stable

La dynamique des interactions fondamentales reste symétrique par renversement du temps.

Nouveau : observation directe de la violation de la symétrie de renversement du temps au sein même de la dynamique de l'interaction fondamentale faible (par courant chargé).

1998 : Violation de T observée dans les Kaons par l'expérience CP Lear

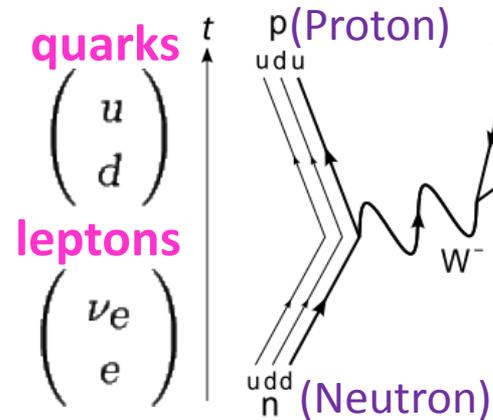
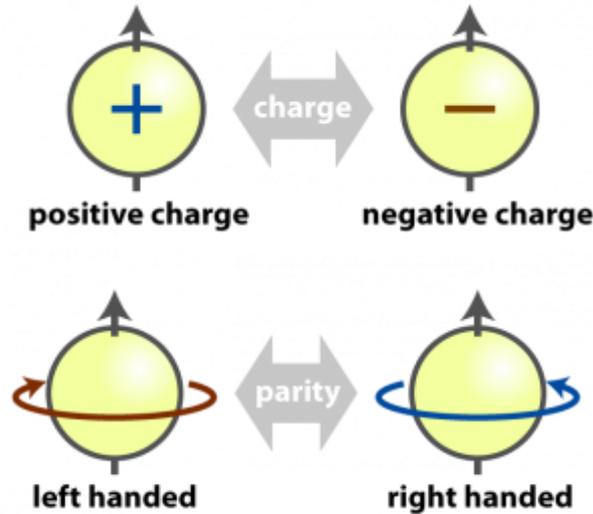
PLB444, 43 (1998)

Résultat indirect et beaucoup moins significatif.

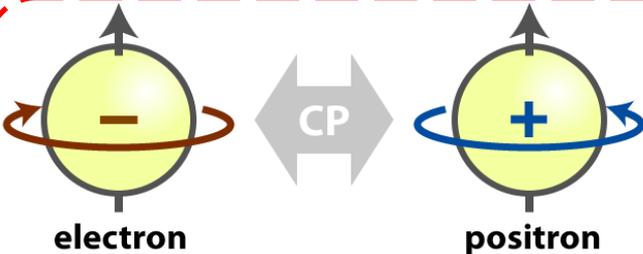
Les symétries **C**harge , **P**arité , **T**emps

Symétries C (charge) et P (parité) conservées par les interactions électromagnétique et forte.

Violation maximale de P et C par l'interaction faible
Ex : désintégration β : $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$



L'interaction faible par courant chargé (W^+ , W^-) n'associe que des particules gauches ou des antiparticules droites.



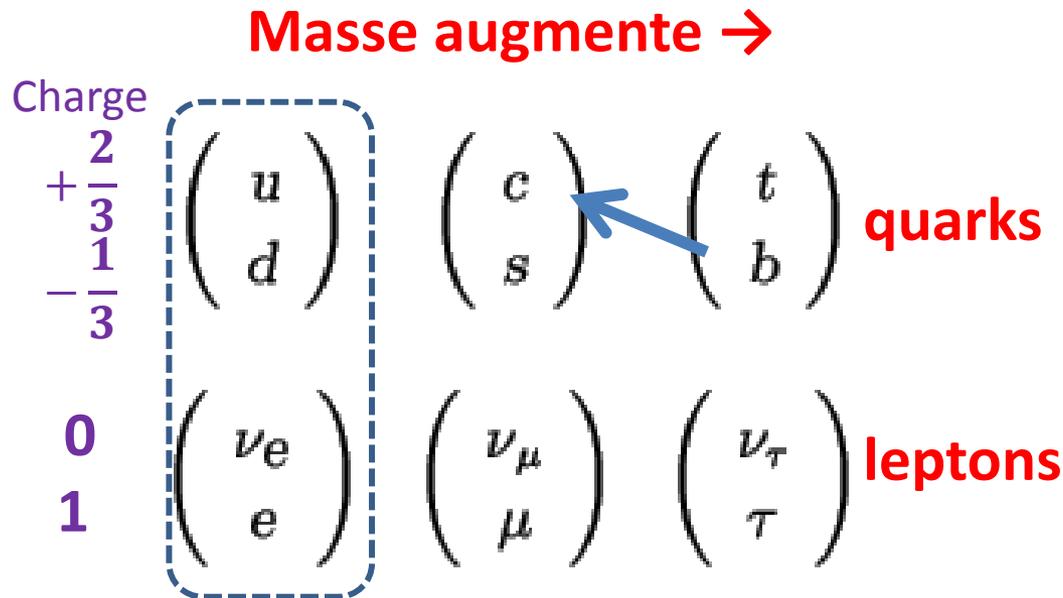
Comparaison matière – antimatière : CP
Produit CP conservé ? L'interaction faible viole aussi CP! car 3 familles de quarks (leptons). Observation dans les kaons en 1964 puis dans les mésons beaux en 2001

Théorème CPT : produit CPT conservé par toutes les théories quantiques des champs connues locales, respectant l'invariance de Lorentz, l'unitarité (somme des probabilités=1) : **si produit CP violé par l'interaction faible \Rightarrow T violé!**

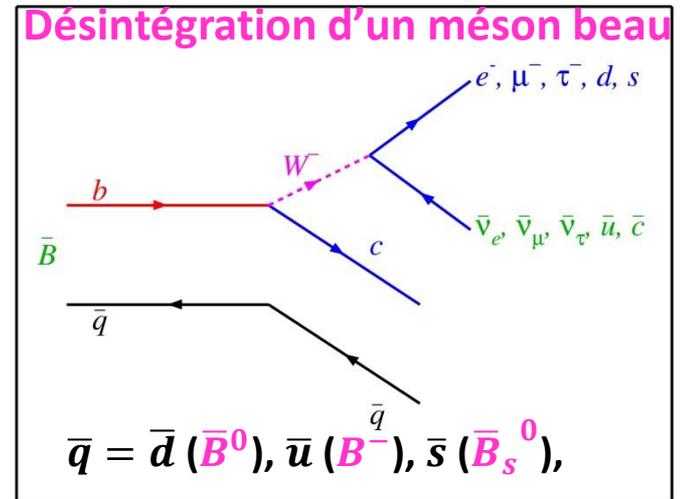
3 familles de quarks et leptons

Interaction faible : seule interaction permettant la désintégration d'un quark (ou lepton) en un quark (lepton) de saveur (famille) différente (changement de charge d'une unité)

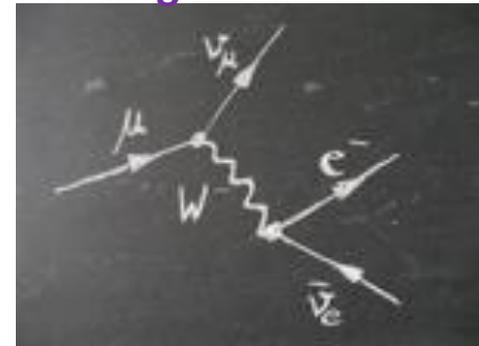
NB : matière stable faite des quarks et leptons les plus légers (quarks u et d constituant les neutrons et protons, et électrons)



Famille la plus légère constituant la matière ordinaire

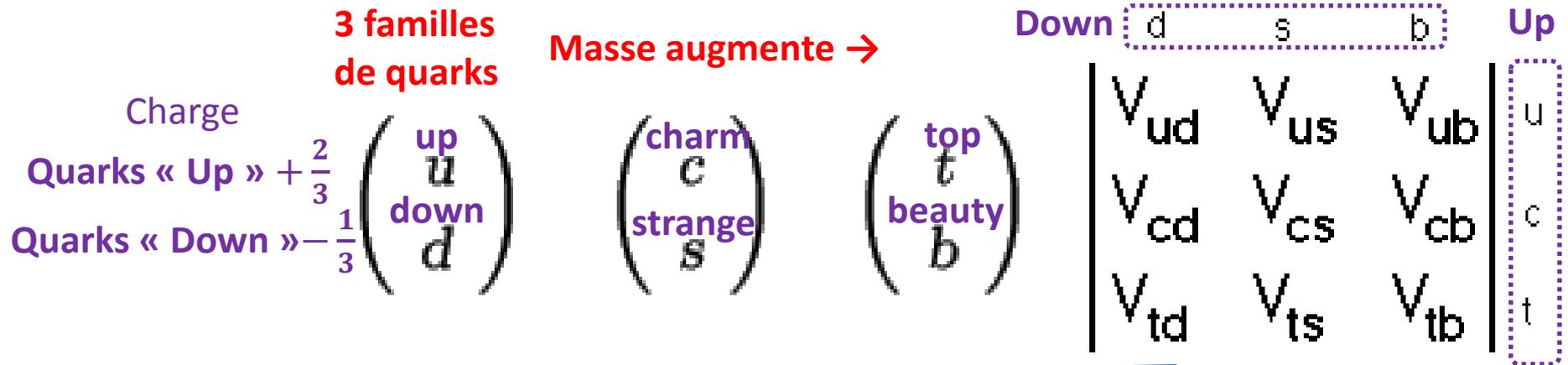


Désintégration du muon



La matrice de CKM (mélange des quarks)

Quarks « Up » (charge +2/3) (u, c, t) associés aux quarks « Down » (charge -1/3) (d, s, b) \Rightarrow 9 combinaisons avec un « couplage » (complexe) différent.
 Représentation: matrice (unitaire) de **C**abibbo-**K**obayashi-**M**askawa (**CKM**)



$$\begin{bmatrix} 0.97428 \pm 0.00015 & 0.2253 \pm 0.0007 & 0.00347^{+0.00016}_{-0.00012} \\ 0.2252 \pm 0.0007 & 0.97345^{+0.00015}_{-0.00016} & 0.0410^{+0.0011}_{-0.0007} \\ 0.00862^{+0.00026}_{-0.00020} & 0.0403^{+0.0011}_{-0.0007} & 0.999152^{+0.000030}_{-0.000045} \end{bmatrix}$$

Valeurs numériques des modules des couplages – Matrice proche de l'identité.

4 paramètres libres dont une phase complexe \Rightarrow Non conservation de la symétrie CP

NB: troisième famille de quarks introduite par Kobayashi et Maskawa avant même sa découverte pour expliquer la violation de CP dans les kaons!

Violation de CP

Si deux « voies » (amplitudes M_1 et M_2) possibles et de phases faibles différentes dans un processus: **interférence** \Rightarrow **violation de CP**

Phases « fortes » θ_1 et θ_2 invariantes de CP

Phases « faibles » ϕ_1 et ϕ_2 inversées par CP

Particules : $a \rightarrow b$

Amplitude: $\mathbf{M} = |M_1|e^{i\theta_1}e^{i\phi_1} + |M_2|e^{i\theta_2}e^{i\phi_2}$

Anti-particules : $\bar{a} \rightarrow \bar{b}$

Amplitude: $\bar{\mathbf{M}} = |M_1|e^{i\theta_1}e^{-i\phi_1} + |M_2|e^{i\theta_2}e^{-i\phi_2}$



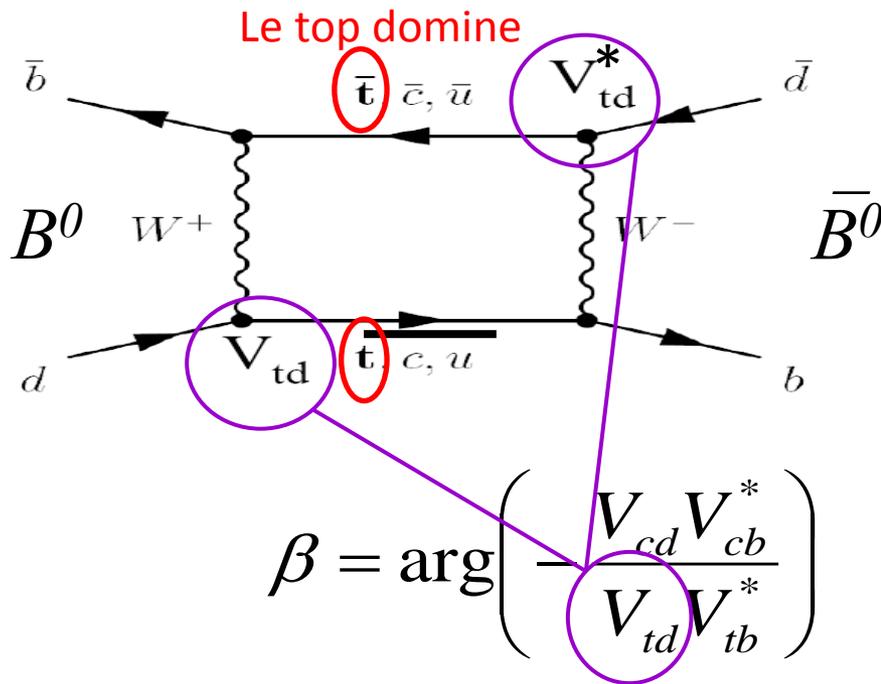
CP violée: $|\mathbf{M}|^2 - |\bar{\mathbf{M}}|^2 = 4|M_1||M_2| \sin(\theta_1 - \theta_2) \sin(\phi_1 - \phi_2)$

Violation de CP bien établie dans le modèle standard
Testée notamment aux usines à beauté BABAR et BELLE, et conforme au mécanisme de CKM.

*Kobayashi and Maskawa
awarded half of 2008 N.P.*



Le mélange $B^0-\bar{B}^0$



Si $P(B^0 \rightarrow \bar{B}^0) = P(\bar{B}^0 \rightarrow B^0)$ (presque vrai)
 \equiv Violation de CP dans le mélange négligeable

Etats propres de propagation, de masse bien définie :

$$|B^{L,H}\rangle \approx \frac{1}{\sqrt{2}} (B^0 \pm \bar{B}^0) = B_{\pm}$$

Etats propres de CP

Différence de masse Δm entre B^L et B^H :
 donne la fréquence des oscillations.

Différence de temps de vie négligeable

Probabilité $|g_-(t)|^2$ ($|g_+(t)|^2$) de mesurer un état \bar{B}^0 (B^0) au temps t de désintégration du méson beau neutre, partant d'un B^0 (\bar{B}^0) produit à $t=0$ (\Rightarrow Schrödinger)

$$|g_{\pm}(t)|^2 = e^{-\frac{t}{\tau}} [1 \pm \cos(\Delta m t)]$$

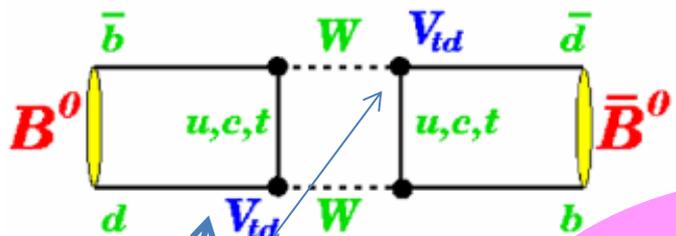
$$\Delta m \sim 0.5 \text{ ps}^{-1}$$

$$\Rightarrow \text{période oscillation} \sim 8 \tau$$

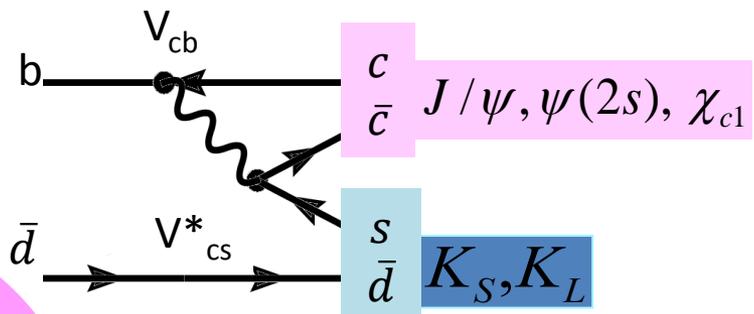
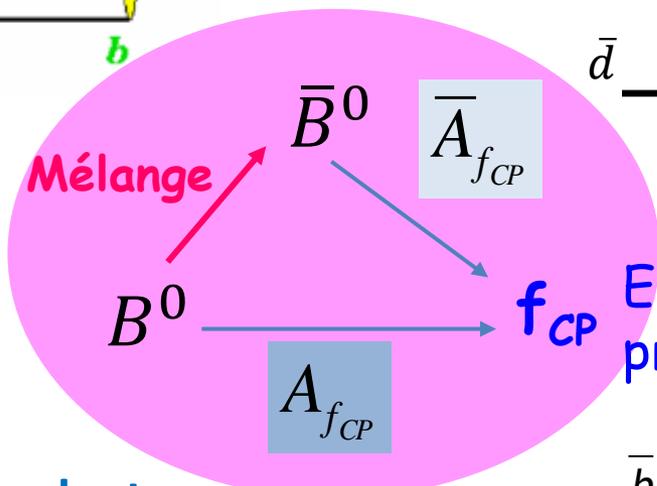
(Temps de vie du méson beau : $\tau \sim 1.5 \text{ ps}$)

Violation de CP dans l'interférence entre la désintégration avec ou sans mélange $B^0 - \bar{B}^0$

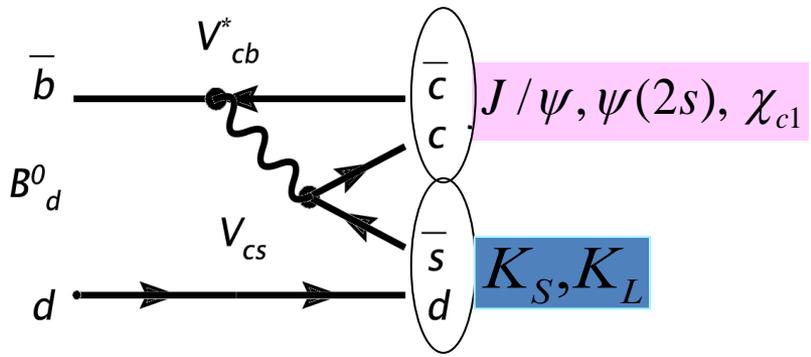
Observée en 2001 par les expériences Belle et BABAR dans les mésons beaux neutres



Phase faible β



Etat final propre de CP (valeur propre η_f)



Asymétrie de CP dépendante du temps :

$$A_{f_{CP}}(\Delta t) = \frac{\Gamma(\bar{B}^0 \rightarrow f_{CP}) - \Gamma(B^0 \rightarrow f_{CP})}{\Gamma(\bar{B}^0 \rightarrow f_{CP}) + \Gamma(B^0 \rightarrow f_{CP})}$$

$$= S \times \sin(\Delta m t) + C \times \cos(\Delta m t)$$

$$S = -\eta_f \sin(2\beta) \quad ; \quad C = 0$$

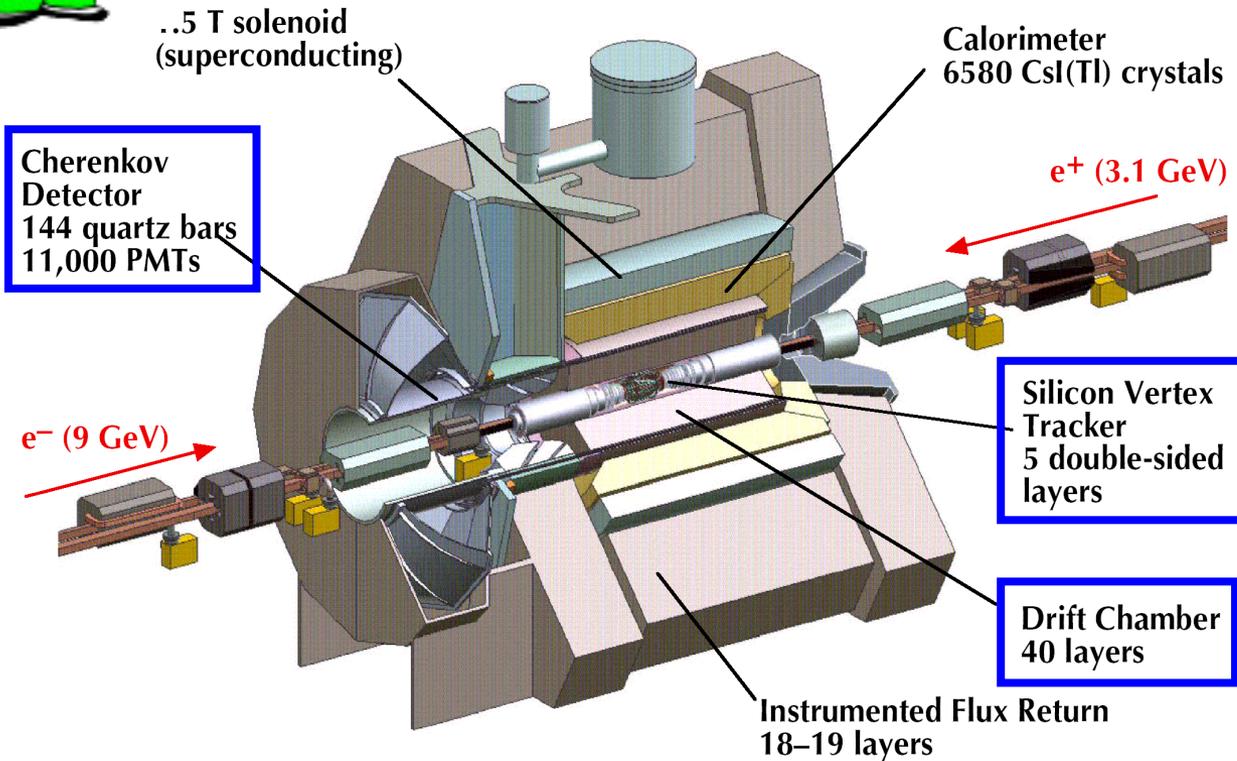
Si pas de violation de CP directe dans la désintégration

L'expérience BABAR



$e^+e^- \rightarrow \Upsilon(4s) \rightarrow B\bar{B}$ $B^0\bar{B}^0$ (état intriqué), ou B^+B^- avec $\beta\gamma \sim 0.5$

BABAR auprès de PEP-II, SLAC, USA

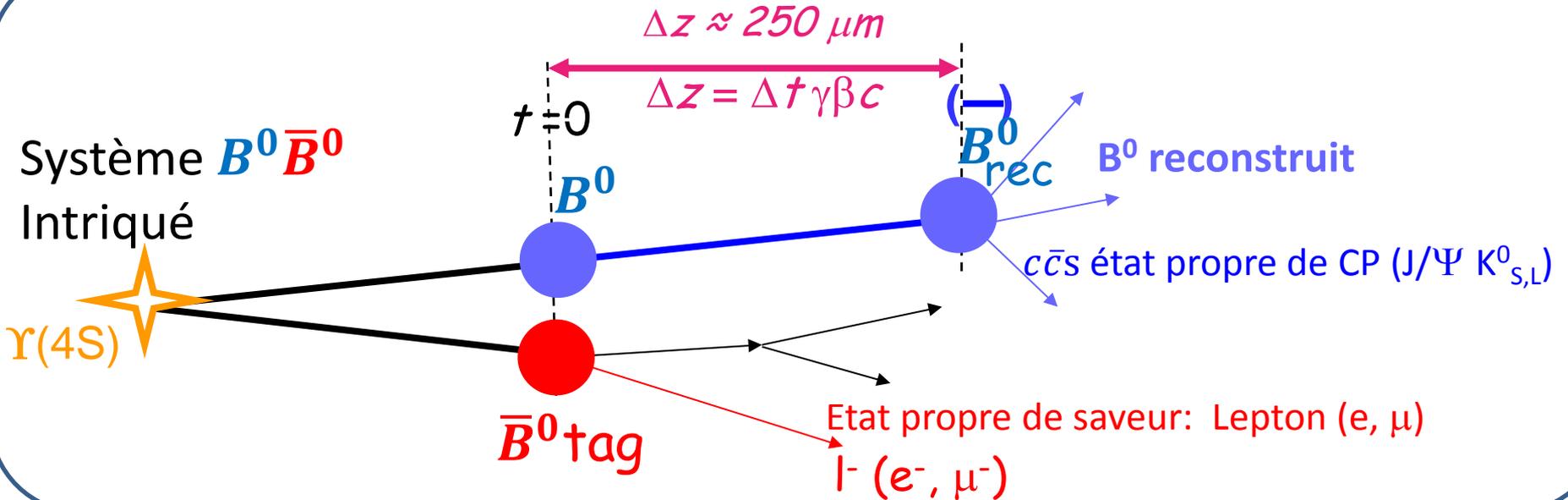


~ 470 millions de paires $B\bar{B}$

Enregistrées de 1999 à 2008

Méthode d'analyse

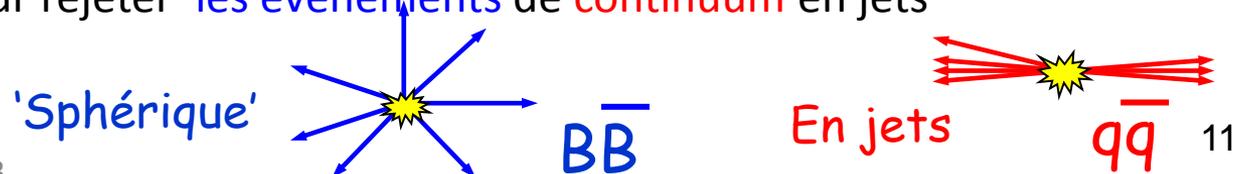
Mesure dépendante du temps



• Variables cinématiques pour distinguer le signal du bruit de fond

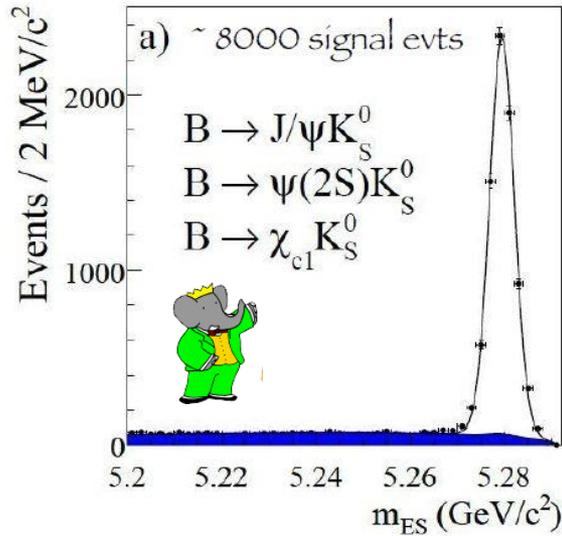
- $m_{ES} = \sqrt{E_{beam}^{*2} - p_B^{*2}}$ (« Beam energy substituted mass ») – Signal pique à m_B
- $\Delta E = E_B^* - E_{beam}^*$ (« Energy difference ») - Signal pique à zéro

• Variables de topologie d'événement combinées à l'aide d'un réseau de neurones ou un discriminant de Fisher pour rejeter les événements de continuum en jets

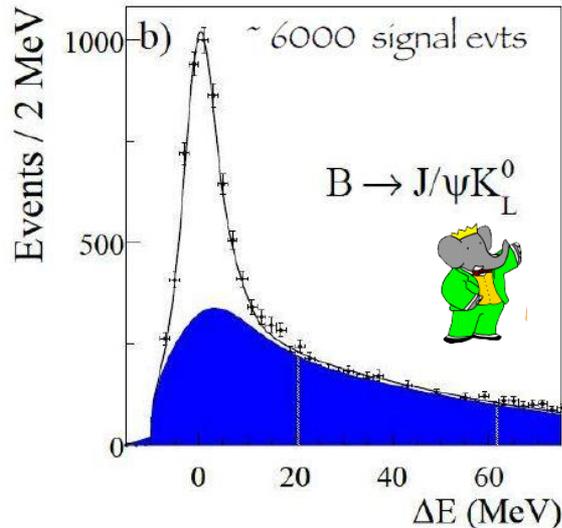


Projection des états propres de CP

Etat propre de CP impair B_-



Etat propre de CP pair B_+



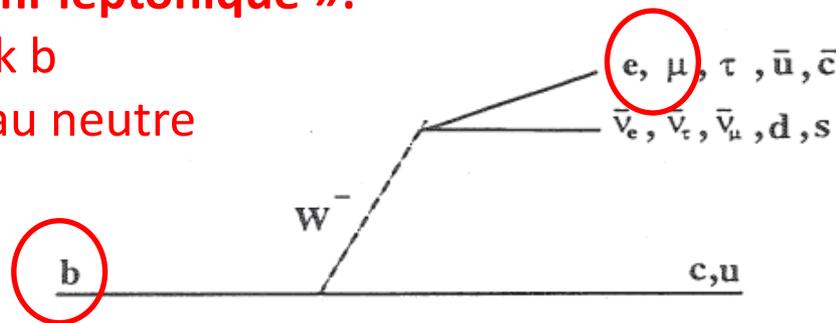
Etats propres de saveur : saveur déterminée par le signe de la charge du lepton dans une désintégration dite « semi-leptonique » :

Charge du lepton e ou μ = charge du quark b

Donne la saveur (B^0 ou \bar{B}^0) du méson beau neutre

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}$$



$$\bar{q} = \bar{d} \text{ pour un } \bar{B}^0 \quad \bar{q}$$

Mesure de la violation de la symétrie CP

Suppose CPT conservé

PRD 79, 072009 (2009)



Distribution du temps de désintégration d'un B^0 ou d'un \bar{B}^0 en un état final propre de CP

$$|g_{\pm}(t)|^2 = e^{-\frac{\Delta t}{4\tau}} \left[1 \pm \eta_f \sin(2\beta) \sin(\Delta m \Delta t) \right]$$

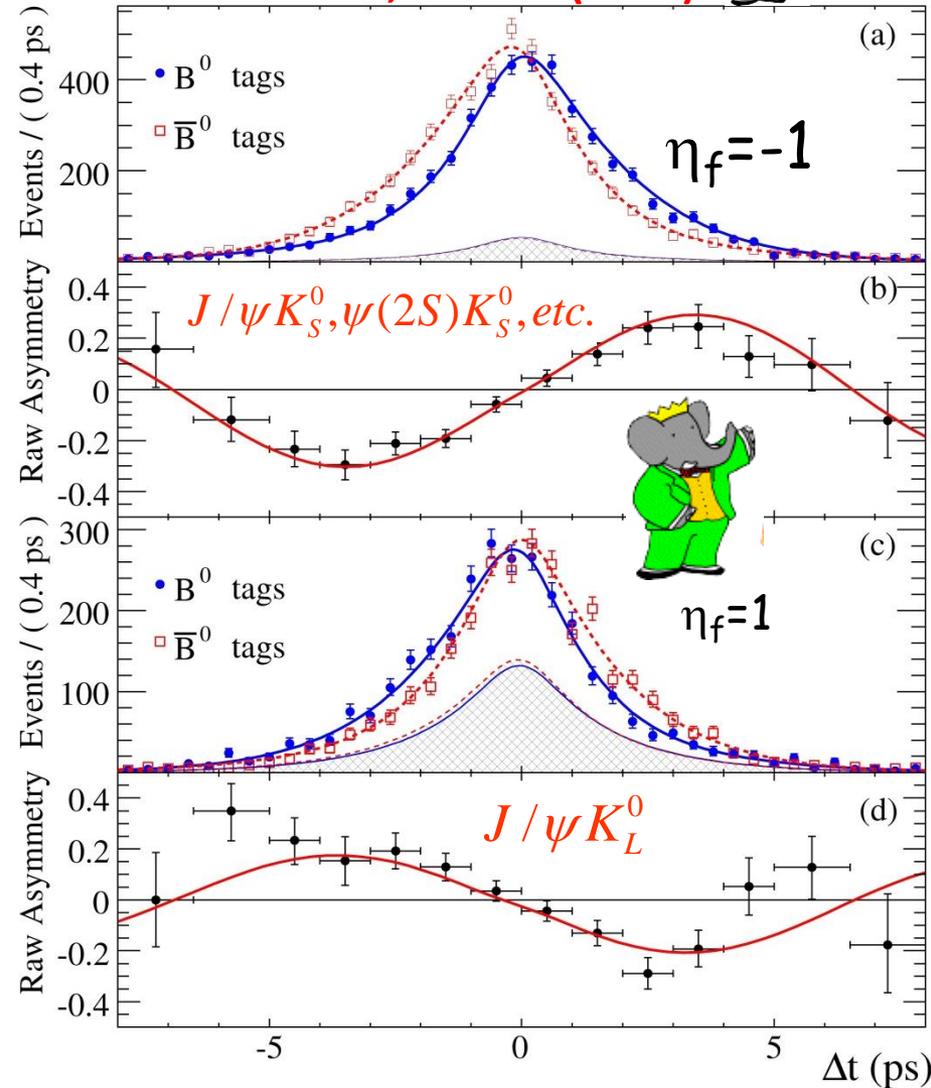
Asymétrie entre B^0 et \bar{B}^0

$$A_f(\Delta t) = -\eta_f \sin 2\beta \cdot \sin(\Delta m \Delta t)$$

$$\eta_f \sin 2\beta = 0.687 \pm 0.028 \text{ (stat)} \pm 0.012 \text{ (syst)}$$

B. Aubert et al. (BABAR Collab),
Phys. Rev.D 79, 072009 (2009)

Autre mesure dans l'expérience BELLE



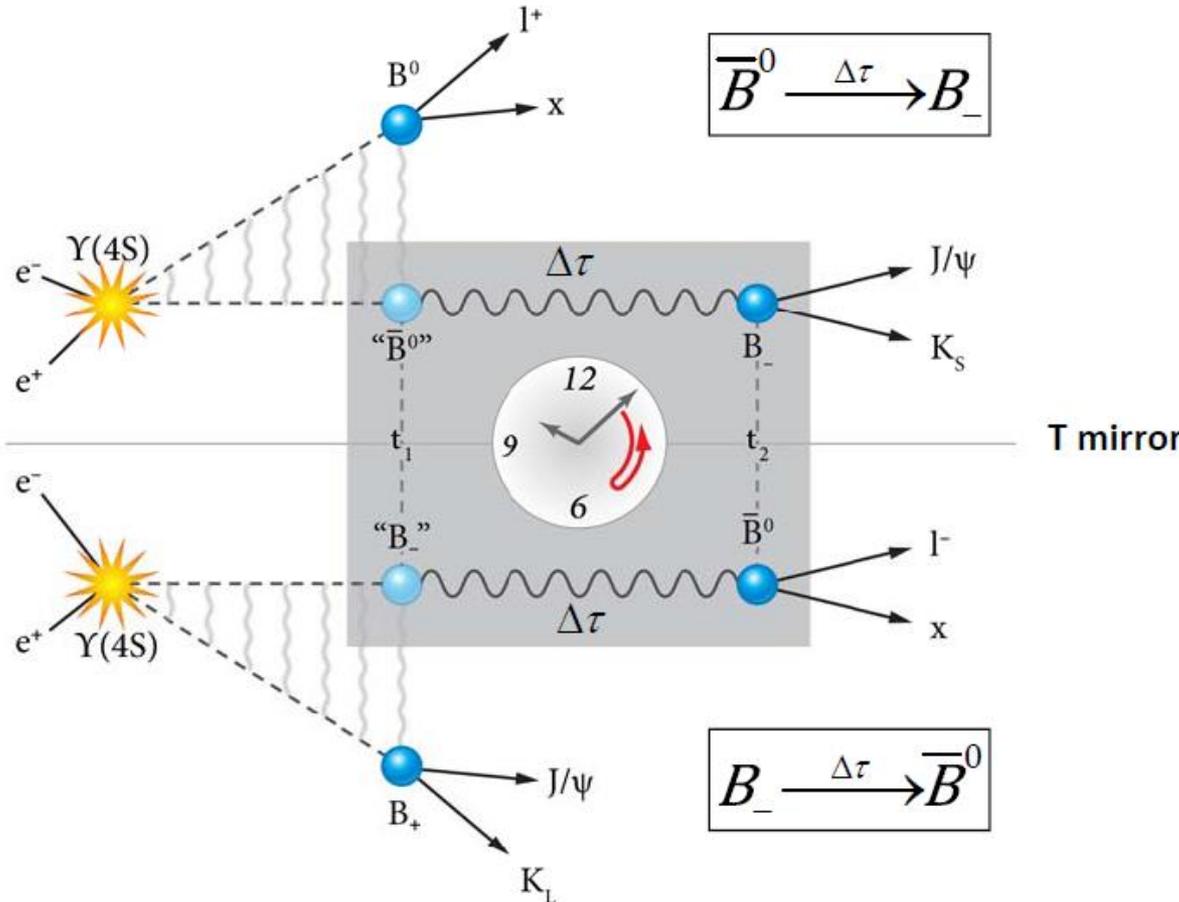
Observation directe de la violation de T

Intrication (type EPR) issue de la désintégration de l' $\Upsilon(4S)$

$$|i\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} [B^0(t_1)\bar{B}^0(t_2) - \bar{B}^0(t_1)B^0(t_2)]$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2}} [B_+(t_1)B_-(t_2) - B_-(t_1)B_+(t_2)]$$

Désintégrations semileptoniques, projection état de saveur:
 B^0 en l^+ , \bar{B}^0 en l^-
 $J/\Psi K_L$ projection état CP pair B_+
 $J/\Psi K_S$ projection état CP impair B_-



4 comparaisons indépendantes pour T (4 pour CP et 4 pour CPT)

Pour T, la comparaison induit :

1. Des signes opposés de $\Delta\tau$
 $\Delta\tau = t_{CP} - t_{flav}$
2. Différents états propres de CP reconstruits ($J/\Psi K_S$ vs. $J/\Psi K_L$).
3. Etats propres de saveur opposée (B^0 vs \bar{B}^0).

Observation directe de la violation de T (2)

Signal (reco parfaite), cas général, sans hypothèse de conservation de CPT

Distribution de $\Delta\tau$ entre les deux mésons beaux de l'événement, l'un état propre de saveur α , l'autre état propre de CP β

$$g_{\alpha,\beta}^{\pm}(\Delta\tau) \propto e^{-\Gamma|\Delta\tau|} \mathcal{H}(\pm\Delta\tau) [1 + S_{\alpha,\beta}^{\pm} \sin(\Delta m_d \Delta\tau) + C_{\alpha,\beta}^{\pm} \cos(\Delta m_d \Delta\tau)]$$

Heavyside step function

8 jeux de paramètres S, C : $2 \Delta\tau (\Delta\tau > 0, \Delta\tau < 0) \times 2 \text{ flavor } (B^0, \bar{B}^0) \times 2 \text{ CP } (K_S, K_L)$
 $\pm \qquad \qquad \qquad \alpha \qquad \qquad \qquad \beta$

8 jeux de paramètres extraits par maximum de vraisemblance sur les événements:
 $B^0, \bar{B}^0, c\bar{c}K_S$, and $J/\psi K_L$ for $\Delta\tau > 0$ and $\Delta\tau < 0$ events.

Hypothèse : CPT conservé

Pour les mesures habituelles de violation de CP, un seul jeu de paramètres S, C

Dans le formalisme du Modèle Standard et de CKM: $S \sim \sin 2\beta$ and $C \sim 0$

Observation directe de la violation de T (3)

Parameter	PRL 109, 211801 (2012)	Result
$\Delta S_T^+ = S_{\ell^- X, J/\psi K_L^0}^- - S_{\ell^+ X, c\bar{c}K_S^0}^+$		$-1.37 \pm 0.14 \pm 0.06$
$\Delta S_T^- = S_{\ell^- X, J/\psi K_L^0}^+ - S_{\ell^+ X, c\bar{c}K_S^0}^-$		$1.17 \pm 0.18 \pm 0.11$
$\Delta C_T^+ = C_{\ell^- X, J/\psi K_L^0}^- - C_{\ell^+ X, c\bar{c}K_S^0}^+$		$0.10 \pm 0.16 \pm 0.08$
$\Delta C_T^- = C_{\ell^- X, J/\psi K_L^0}^+ - C_{\ell^+ X, c\bar{c}K_S^0}^-$		$0.04 \pm 0.16 \pm 0.08$
$\Delta S_{CP}^+ = S_{\ell^- X, c\bar{c}K_S^0}^+ - S_{\ell^+ X, c\bar{c}K_S^0}^-$		$-1.30 \pm 0.10 \pm 0.07$
$\Delta S_{CP}^- = S_{\ell^- X, c\bar{c}K_S^0}^- - S_{\ell^+ X, c\bar{c}K_S^0}^+$		$1.33 \pm 0.12 \pm 0.06$
$\Delta C_{CP}^+ = C_{\ell^- X, c\bar{c}K_S^0}^+ - C_{\ell^+ X, c\bar{c}K_S^0}^-$		$0.07 \pm 0.09 \pm 0.03$
$\Delta C_{CP}^- = C_{\ell^- X, c\bar{c}K_S^0}^- - C_{\ell^+ X, c\bar{c}K_S^0}^+$		$0.08 \pm 0.10 \pm 0.04$
$\Delta S_{CPT}^+ = S_{\ell^+ X, J/\psi K_L^0}^- - S_{\ell^+ X, c\bar{c}K_S^0}^+$		$0.16 \pm 0.20 \pm 0.09$
$\Delta S_{CPT}^- = S_{\ell^+ X, J/\psi K_L^0}^+ - S_{\ell^+ X, c\bar{c}K_S^0}^-$		$-0.03 \pm 0.13 \pm 0.06$
$\Delta C_{CPT}^+ = C_{\ell^+ X, J/\psi K_L^0}^- - C_{\ell^+ X, c\bar{c}K_S^0}^+$		$0.15 \pm 0.17 \pm 0.07$
$\Delta C_{CPT}^- = C_{\ell^+ X, J/\psi K_L^0}^+ - C_{\ell^+ X, c\bar{c}K_S^0}^-$		$0.03 \pm 0.14 \pm 0.08$

Les paramètres de violation de T et de CP se compensent, résultant en l'absence de violation de CPT

Paramètres de violation de CPT compatibles avec 0

PRL 109, 211801 (2012) Pas de violation de T

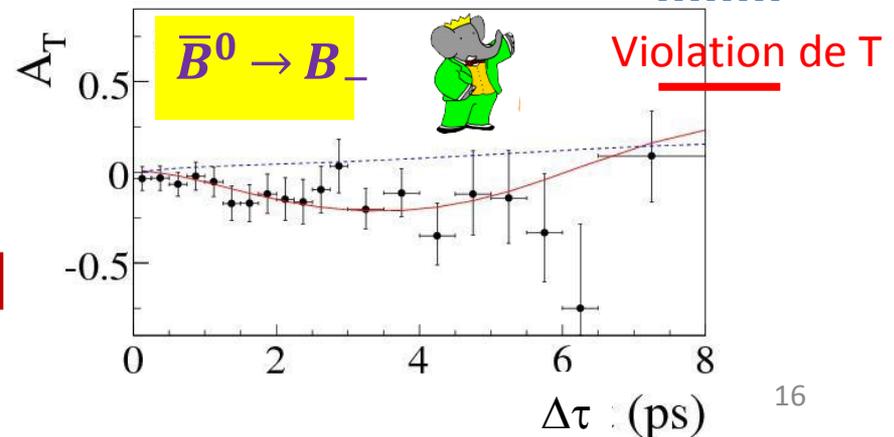


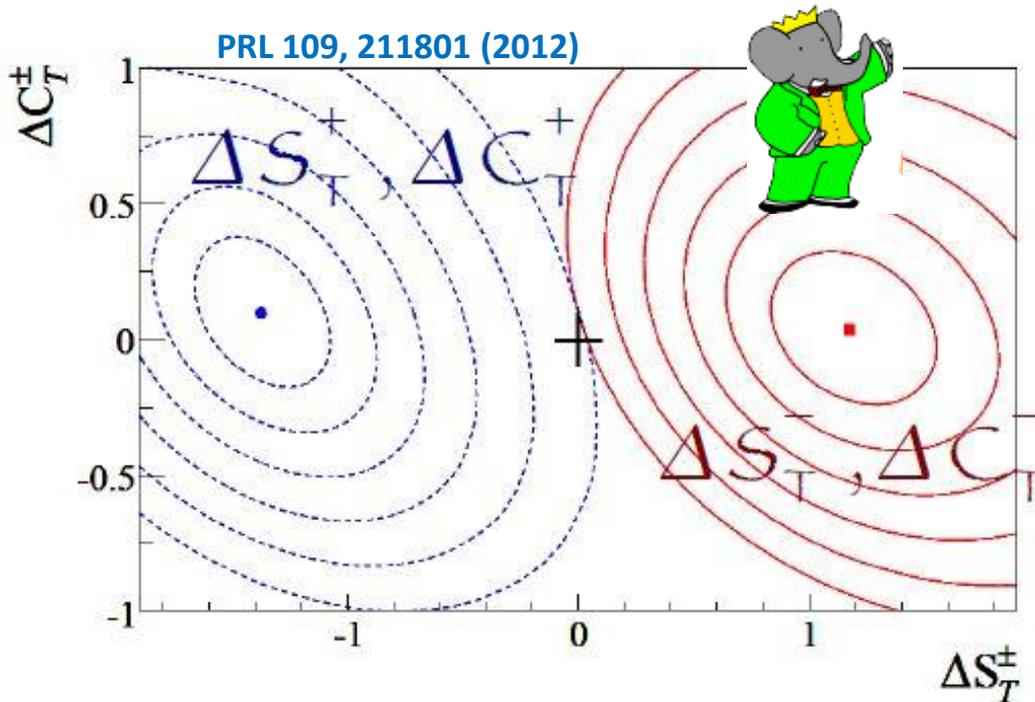
Illustration :

Une des 4 asymétries indépendantes violant T
 Dans le cas idéal, sans effets de reconstruction :

$$A_T \approx \frac{1}{2} [\Delta S_T^\pm \sin(\Delta m |\Delta\tau|) + \Delta C_T^\pm \cos(\Delta m |\Delta\tau|)]$$

Observation directe de la violation de T (4)

-2 ln ΔL : contour de maximum de vraisemblance, erreurs systématiques incluses



Première observation directe de la violation de T! (14 σ)

due à la violation de CP dans l'interférence entre la désintégration avec/sans mélange B.

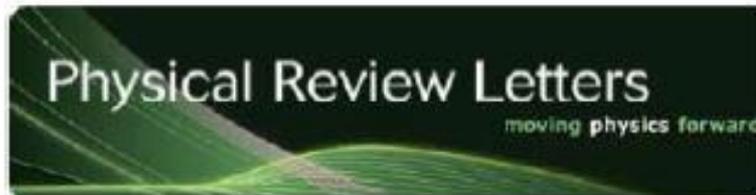
Violation de CP observée avec 16.6 σ

Violation de T : attendue mais jamais mesurée directement auparavant.

Violation de CPT violation compatible avec 0: 0.33 σ



Observation of Time-Reversal Violation in the B^0 Meson System



Physics 5, 129 (2012)

Viewpoint

Particle Decays Point to an Arrow of Time

Michael Zeller

Department of Physics, Yale University, New Haven, CT 06520, USA

Published November 19, 2012

APS Journals

- Current Issue
- Earlier Issues
- About This Journal
- Journal Staff
- About the Journals
- Search the Journals
- APS Home
- Join APS

Authors

- > General Information
- > Submit a Manuscript
- > Publication Rights
- > Open Access
- > Policies & Practices
- > Tips for Authors
- > Professional Conduct

Referees

- > General Information
- > Submit a Report
- > Update Your Information
- > Policies & Practices
- > Referee FAQ
- > Advice to Referees

APS » Journals » Physical Review Letters

Physical Review Letters

Highlights

 Editors' 
 Suggestions

 Recent 
 Papers

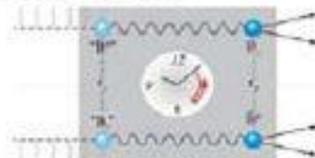

On the Cover

Fluorescent dyes spaced by short DNA strands probe Förster energy transfer in a controlled nanophotonic environment defined by a mirror. [Christian Blum, Niels Zijlstra, Ad Lagendijk, Martijn Wubs, Allard P. Mosk, Vinod Subramaniam, and Willem L. Vos. *Phys. Rev. Lett.* 109, 203801 (2012)]

[Read Article](#) | [More Covers](#)

Physics: Particle Decays Point to an Arrow of Time

November 19, 2012



(2012)]

[Read Article](#) | [More viewpoints](#)

An experiment studying B meson decays makes a direct observation of time-reversal violation without relying on assumed relationships with other fundamental symmetries.

 [Viewpoint on *Phys. Rev. Lett.* 109, 211801

[PhysicsWorld.com](http://physicsworld.com) has selected the [BaBar time-reversal measurement](#) as one of the top 10 breakthroughs for 2012.

<http://physicsworld.com/cws/article/news/2012/dec/14/physics-world-reveals-its-top-10-breakthroughs-for-2012>

Time-reversal violation

"To the BaBar collaboration for making the first direct observation of time-reversal violation by measuring the rates at which the B^0 meson changes quantum states."

Physicists have been waiting for almost 50 years for a direct observation of time-reversal (T) violation. Now, researchers analysing data obtained at the BaBar detector at the PEP-II facility at the SLAC National Accelerator Laboratory in California have done just that. The collaboration focused on transitions between the quantum states of the B^0 meson and found that the transition rates differed. While T-violation comes as no surprise, its direct experimental measurement is an important verification of quantum field theory.

Pour en savoir plus, par exemple...

Physics World:

<http://physicsworld.com/cws/article/news/2012/nov/21/babar-makes-first-direct-measurement-of-time-reversal-violation>

Séminaire au CERN par Fernando Martinez-Vidal le 18 décembre 2012

<https://indico.cern.ch/getFile.py/access?resId=0&materialId=slides&confId=221757>

Article prévu dans « Reflets de la physique » en décembre 2013

La violation de CP – Jacques Chauveau

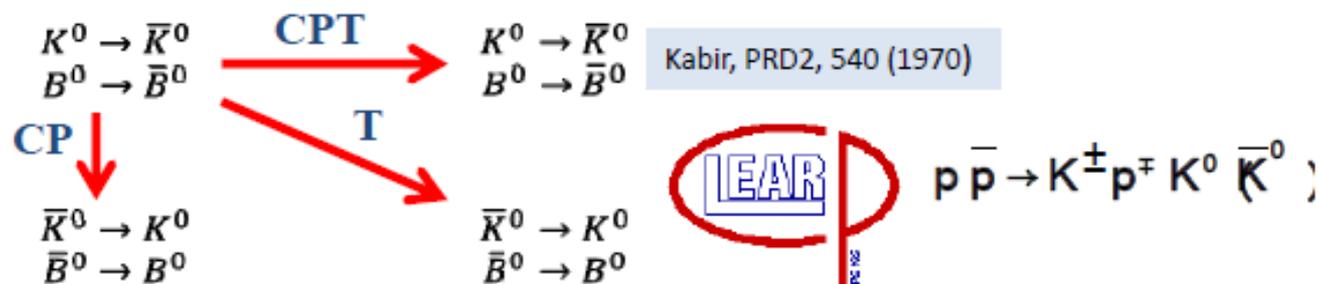
<http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/divers/pdfspm/IdP01-02/16.pdf>

Back-up

T violation in unstable systems (cont'd)

➤ Compare $a \rightarrow b$ vs. $b \rightarrow a$ in mixing processes

- ✓ Mixing has been observed in K, B, and more recently in D neutral systems



- ✓ This flavor mixing asymmetry is both T and CP violating (the two transformations lead to the same observation), and independent of time
- ✓ $\sim 4\sigma$ signal of $K^0 \rightarrow \bar{K}^0$ vs. $\bar{K}^0 \rightarrow K^0$ asymmetry PLB444, 43 (1998)
- ✓ This is the first direct evidence of T and CP violation
 - ✓ Via mixing and using semileptonic decays to tag kaons at decay time
 - ✓ Only detailed balance, no unitarity (Bell-Steinberger relations)
 - ✓ Some “controversy” in the interpretation of the observable

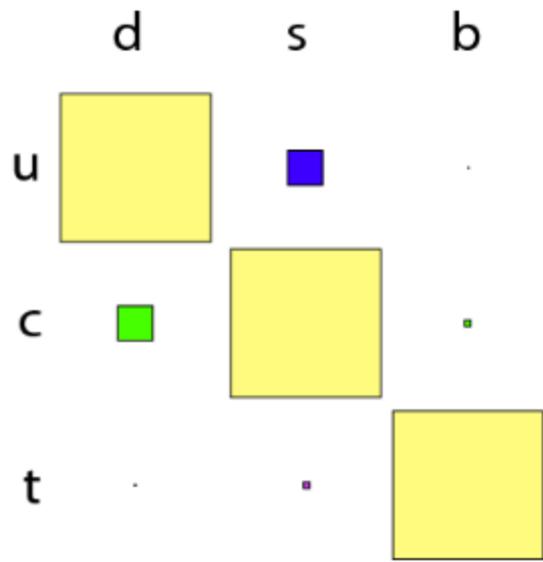
Gerber, Eur. Phys. Jour. C 35, 195 (2004)

Alvarez-Gaume et al, Phys. Lett. B 458 (1999)

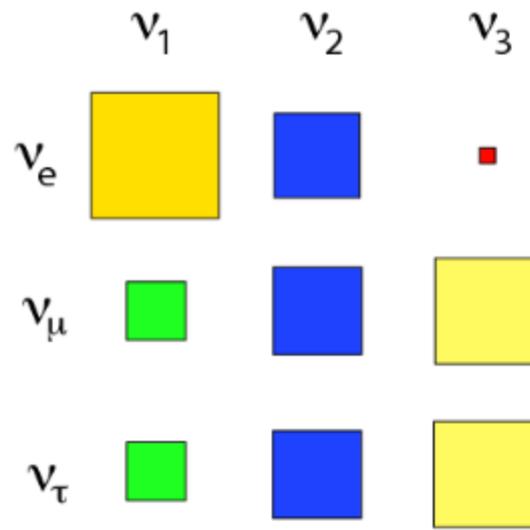
Wolfenstein, Int. Jour. Mod. Phys. E8, 501 (1999)

Tests of Conservation Laws, PDG, 2012

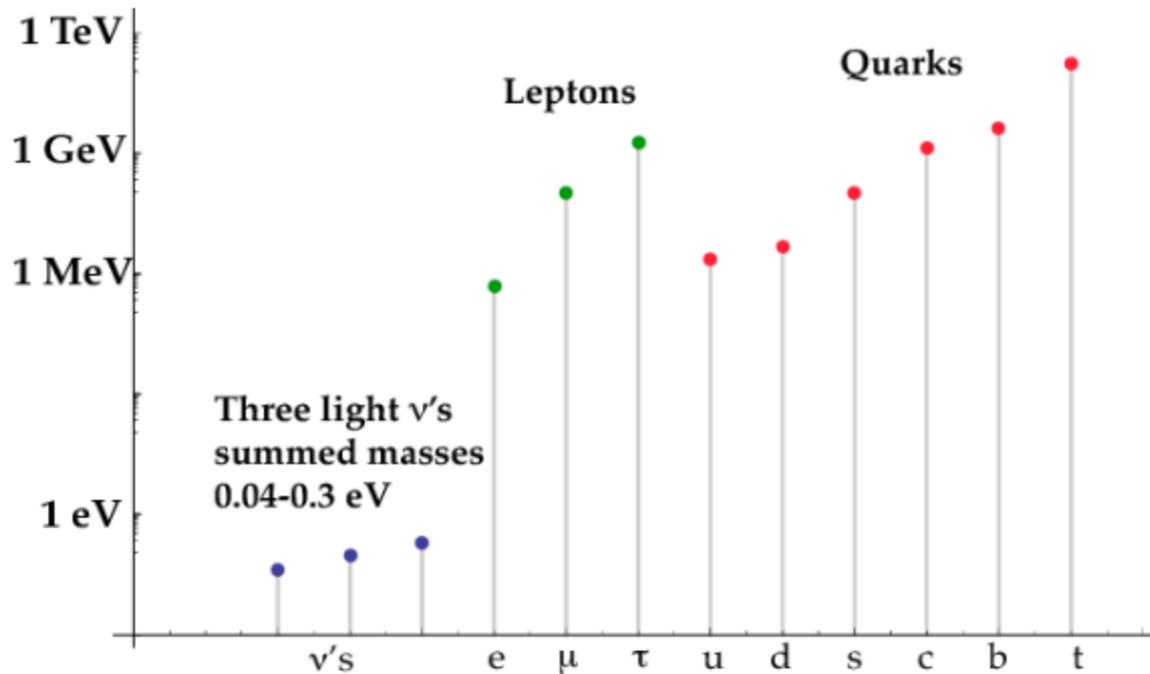
CKM



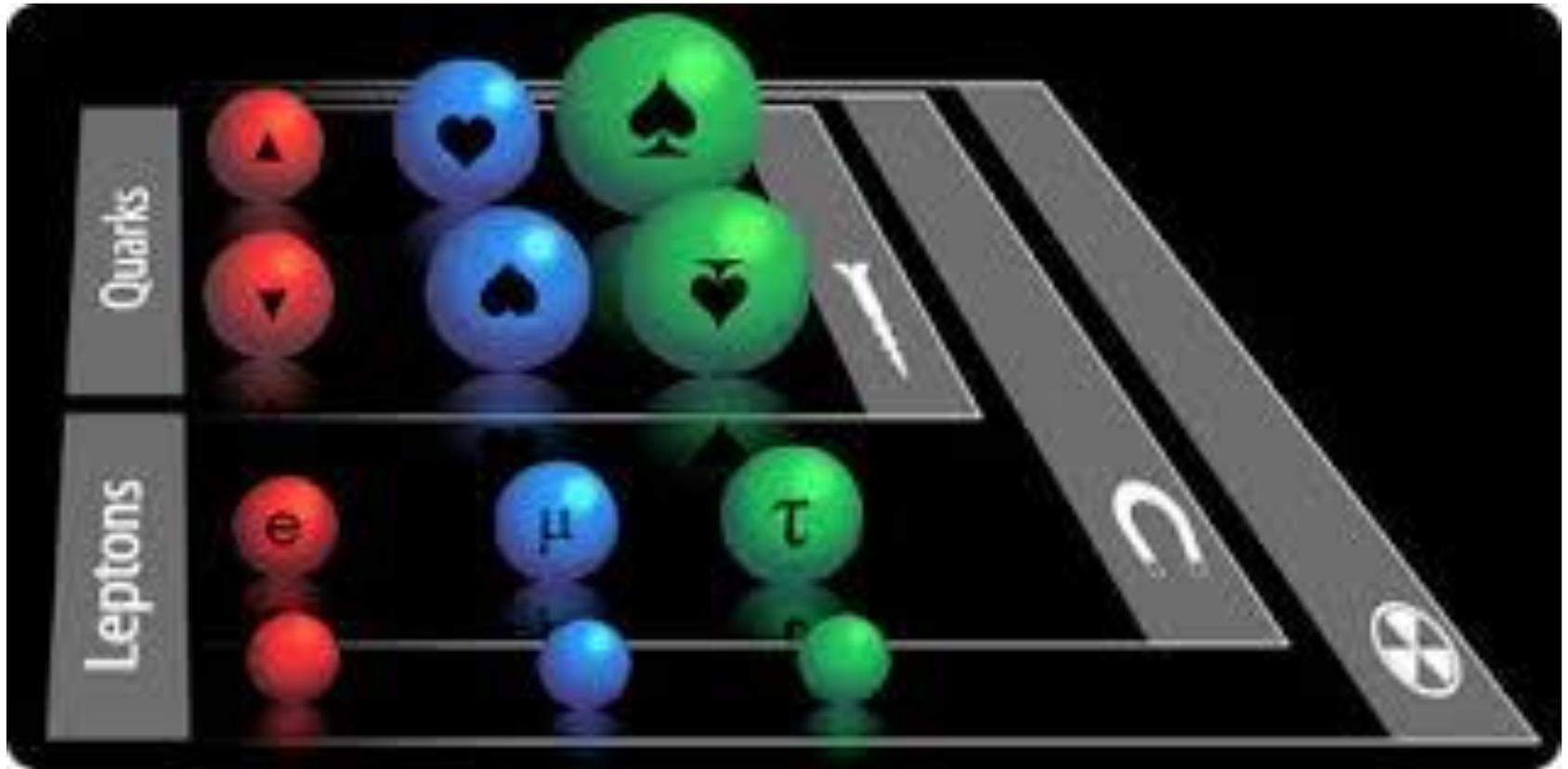
PMNS



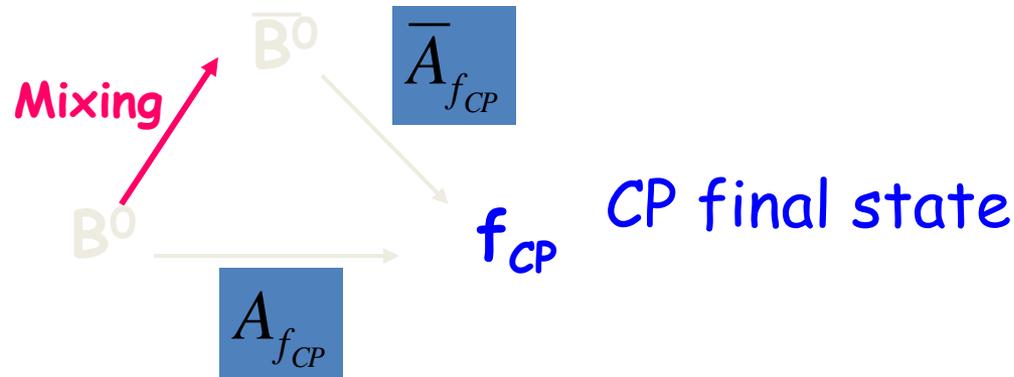
(left) Sizes of the the CKM matrix elements for quark mixing, and (right) the PMNS matrix elements for neutrino mixing. The area of the squares represents the square of the matrix elements.



Lepton and quark masses.



CP violation in the interference between mixing and decay



Time-dependent CP asymmetry

$$A_{f_{CP}}(\Delta t) = \frac{\Gamma(\bar{B}^0 \rightarrow f_{CP}) - \Gamma(B^0 \rightarrow f_{CP})}{\Gamma(\bar{B}^0 \rightarrow f_{CP}) + \Gamma(B^0 \rightarrow f_{CP})}$$

$$= S_{f_{CP}} \sin(\Delta m_d \Delta t) - C_{f_{CP}} \cos(\Delta m_d \Delta t)$$

$$\lambda_{f_{CP}} \approx e^{-2i\beta} \times \frac{\bar{A}_{f_{CP}}}{A_{f_{CP}}}$$

Mixing

$S \neq 0$: Indirect CP violation

$$S_{f_{CP}} = \frac{2 \Im(\lambda_{f_{CP}})}{1 + |\lambda_{f_{CP}}|^2}$$

$C \neq 0$: Direct CP violation

$$C_{f_{CP}} = \frac{1 - |\lambda_{f_{CP}}|^2}{1 + |\lambda_{f_{CP}}|^2}$$